

Самбуров А.Е., Екидин А.А., Васянович М.Е.
samburov-86@mail.ru

РАДИОНУКЛИДЫ В ВЫБРОСАХ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Представлены результаты определения радионуклидного состава и объемной активности радиоактивных газов и аэрозолей в выбросах организованных источников Белоярской АЭС. Для исследования применялись методы и технические средства с нижним пределом измерений на 2-3 порядка чувствительнее штатных систем радиационного контроля. Впервые получены данные по объемной активности Н-3, С-14 и составу инертных радиоактивных газов. Полученные данные необходимы для обоснования перечня контролируемых радионуклидов и определения для них активности допустимого выброса при нормальной эксплуатации Белоярской АЭС.

Ключевые слова: атмосфера, АЭС, выбросы, доза, оценка, радиоактивные изотопы, нормальная работа.

Abstract. The results of determining the radionuclide composition and volume activity of radioactive gases and aerosols in emissions of organized sources of the Beloyarsk NPP are presented. Methods and technical means with a lower limit of measurements by 2-3 orders of magnitude more sensitive than standard radiation monitoring systems were used for the study. For the first time, data were obtained on the volumetric activity of H-3, C-14 and the composition of inert radioactive gases. The obtained data is necessary to justify the list of controlled radionuclides and to determine for them the activity of permissible emission during normal operation of the Beloyarsk NPP.

Keywords: atmosphere, nuclear power plants, emissions, dose, assessment, radioactive isotopes, normal operation.

Введение

Стремление к устойчивому развитию определяет необходимость активного пересмотра нормативно-правовой и методической документации в области охраны окружающей среды. Изменения природоохранных требований к деятельности объектов использования атомной энергии направлены на ограничение антропогенного воздействия и минимизацию радиационных рисков для населения и окружающей среды. Важным нововведением является утверждение перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 8 июля 2015 г. N 1316-р. Данный перечень содержит 94 радиоактивных изотопа в элементной форме и в виде соединений, отнесенных к веществам, загрязняющим

атмосферный воздух. Для каждого источника выбросов радиоактивных веществ требуется определить какими радионуклидами из перечня формируется 99% годовой эффективной дозы населения.

Для предприятий, где происходит обращение с известными радиоактивными материалами, при неизменном радионуклидном составе выбор и обоснование основных дозообразующих радионуклидов не представляет сложности. В случае с источниками выбросов АЭС такой выбор сделать не просто. В результате ядерной реакции и активации в активной зоне реакторной установки АЭС могут образовываться все 94 радиоактивных изотопа из указанного перечня. Для сравнения, ранее принятые требования ограничивались контролем в источниках выбросов АЭС четыре отдельных радионуклидов, суммарной активностью инертных радиоактивных газов (далее ИРГ), суммарной активностью альфа-излучающих и бета излучающих радионуклидов [13].

Предварительные оценки состава выбросов АЭС с реакторными установками на тепловых нейтронах AGR, BWR, LWGR, PWR, CANDU можно получить на основе анализа информации по контролю выбросов в Европе [12]. Полученные оценки не могут быть применены для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, так как радионуклидный состав выбросов и радионуклиды формирующие основную дозу для критической группы населения специфичны для каждого типа реакторных установок АЭС [1-4, 6].

Для идентификации радионуклидов в выбросах Белоярской АЭС при нормальной эксплуатации проведены исследования, включающие:

- выбор методов идентификации радионуклидов в газоаэрозольной смеси;
- выбор сорбентов, фильтрующих материалов и технических средств для отбора проб, обеспечивающих нижний предел измерений на 2-3 порядка чувствительнее штатных систем радиационного контроля;
- проведение серии отбора проб ИРГ, аэрозолей, трития, радиоуглерода, газообразных соединений йода в каждом источнике выброса в режиме работы энергоблоков на полной мощности;
- подготовку счетных образцов из отобранных проб и лабораторные измерения активности.

Результаты исследования позволяют рассчитать значение гипотетической эффективной дозы от каждого радионуклида в каждом исследованном источнике выброса без учета разбавления (в трубе). Если радионуклиды в источнике выброса не могут создать гипотетическую эффективную дозу от всех путей облучения больше 10 мкЗв в год без учета разбавления, то выполняется условие

обоснование «освобождение от контроля» [14]. Для остальных источников требуется оценить вклад в суммарную гипотетическую дозу от каждого радионуклида с целью определения основных дозообразующих радионуклидов. Определение всех радионуклидов, формирующих нарастающий итогом 99% суммарной гипотетической дозы от выброса, необходимо для разработки нормативов допустимых выбросов и организации адекватной системы мониторинга.

Формирование выбросов радиоактивных веществ Белоярской АЭС при нормальной эксплуатации

На Белоярской АЭС в разные годы были построены четыре энергоблока. Энергоблоки № 1 и № 2 с водографитовыми канальными реакторами АМБ-100 (мощность 100 МВт) и АМБ-200 (мощность 200 МВт), введены в эксплуатацию в 1964 и 1967 гг., соответственно. Эти энергоблоки были остановлены, соответственно, в 1981 и 1989 гг. Все технологические системы, работа которых не требуется по условиям безопасности, остановлены. В работе находятся только вентиляционные системы для поддержания температурного режима в помещениях и система радиационного контроля, работа которых обеспечивается круглосуточно квалифицированным персоналом.

В настоящее время на Белоярской АЭС эксплуатируются два энергоблока: энергоблок № 3 мощностью 600 МВт с реактором на быстрых нейтронах корпусного типа БН-600 с жидкометаллическим теплоносителем (введен в эксплуатацию в апреле 1980 г.) и энергоблок № 4 с реактором БН-800, который введен в промышленную эксплуатацию 31 октября 2016 г. Энергоблок № 3 был первым в мире энергоблоком с реактором на быстрых нейтронах. Новый энергоблок № 4 является самым мощным в мире энергоблоком с реактором на быстрых нейтронах.

В режиме нормальной эксплуатации Белоярской АЭС основными источниками поступления радионуклидов в атмосферу являются газообразные выбросы, содержащие примеси радиоактивных аэрозолей и газов. Пилотные исследования, выполненные в 2016 году, показали, что газоаэрозольные выбросы Белоярской АЭС могут включать следующие компоненты [5]:

- инертные радиоактивные газы (изотопы криптона, ксенона, аргона);
- углерод-14, тритий;
- аэрозоли, содержащие радиоактивные продукты деления и активации;
- изотопы йода в газовой и аэрозольной форме.

Формирование газоаэрозольных выбросов Белоярской АЭС, в основном, идет за счет:

- технологических сдувок;
- процесса вентиляции зон контролируемого доступа зданий реакторного отделения и спецкорпуса.

Кроме вышеперечисленных путей поступления газообразных РВ с выбросами в атмосферу, менее значимыми каналами поступления являются выходы радиоактивных газов и аэрозолей из бассейна выдержки, из РУ при перегрузке топлива, из вытяжных шкафов радио- и химлабораторий, с местными «отсосами» от оборудования при реализации некоторых технологических процессов (ремонтах, переработке), с отходящими дымовыми газами установки сжигания и пр.

При нормальной эксплуатации Белоярской АЭС выбросы радионуклидов в атмосферу происходит через 11 организованных источников:

- ВТ-1, ВТ-2 – венттрубы блоков № 1, 2 (АМБ-100, АМБ-200). Газоаэрозольный выброс обусловлен функционированием систем вентиляции ЗКД блоков № 1, 2 при подготовке энергоблоков к выводу из эксплуатации (аппаратного отделения, бассейнов выдержки топлива, центральных залов и т.д.)

- ВТ ХЖО – венттруба хранилища жидких радиоактивных отходов. Выброс формируется за счет вентиляции помещений ХЖО, в которых осуществляются технологические операции по перекачке, концентрированию и хранению ЖРО.

- ВТ УСТ-25 – венттруба установки по сжиганию низкоактивных ТРО.

- ВТ-3, ВТ-4 – венттрубы блоков № 3 (БН-600) и № 4 (БН-800). Выброс формируется технологическими сдувками и функционированием систем вентиляции реакторных отделений.

- ВТ САРХ ВТО – три венттрубы систем аварийного расхолаживания реактора, выброс формируется при контакте воздуха теплообменников со вторым натриевым контуром в режиме аварийного или планового охлаждения реактора.

- ВТ СК – венттруба спецбытового корпуса блока № 4, радионуклидный состав выброса определяется функционированием систем вентиляции технологических линий по обеспечению ВХР, систем СВО, очистки трапных вод и вод спецпрачечной.

В таблице 1 приведены характеристики источников выбросов Белоярской АЭС при работе энергоблоков.

Таблица 1 – Характеристики источников выбросов радиоактивных веществ
Белоярской АЭС

№ источ- ника п.п.	Обозначение (код)	Высоты трубы, м	Диаметр устья, м	Расход воздуха через устье, м ³ /год
<i>1</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	ВТ-1	100	2,5	$6,57 \cdot 10^8$
2	ВТ-2	100	2,5	$1,01 \cdot 10^9$
3	ВТ-3	100	4	$5,00 \cdot 10^9$
4	ВТ САРХ ВТО	30	1,4	$3,46 \cdot 10^5$
5	ВТ ХЖО	10	0,9	$3,36 \cdot 10^7$
6	ВТ УСТ-25	8	0,4	$3,36 \cdot 10^5$
7	ВТ САРХ ВТО UJD	106	6	$8,40 \cdot 10^5$
8	ВТ САРХ ВТО 1UBR	106	6	$8,40 \cdot 10^5$
9	ВТ САРХ ВТО 2UBR	106	6	$8,40 \cdot 10^5$
10	ВТ-4	100	4,3	$4,99 \cdot 10^9$
11	ВТ СК	70	2,7	$1,75 \cdot 10^9$

Методы и технические средства исследования

Методы исследования радионуклидного состава в каждом источнике выбросов Белоярской АЭС позволяли отдельно определять: инертные радиоактивные газы, углерод-14, тритий, радиоактивные аэрозоли, радиоактивный йод в форме органических и неорганических соединений. Идентификации и оценка объемной активности радионуклидов в источниках выбросов проводилась с использованием разных подходов. Радиоактивные аэрозоли улавливались мощной установкой фильтрации воздуха ВФУ-1200 (рис. 1а). Данная установка позволяет прокачивать около 12 000 м³ в сутки. Для улавливания аэрозолей применялись различных фильтрующие и сорбционно-фильтрующие материалы, обладающие высокой эффективностью удержания аэрозолей (АФА-ХС, АФА-СФМ, АФА-ЗДА). Аэрозольный фильтр, состоящий из микроволокнистых материалов, использовался для фильтрации радиоактивных аэрозолей продуктов деления и коррозии [7]. Для определения объемной активности и форм радиоактивного йода применялись многослойные сорбционно-фильтрующих материалы на основе активированного угля [8-10].

Радиоактивные благородные газы отбирались в специальный металлический сосуд под давлением 600 кПа (рис. 1б) для последующего гамма-

спектрометрического определения ИРГ. Тритий и радиоуглерод собирались с помощью специальной системы барботеров, обеспечивающей расход воздуха $\sim 42 \text{ дм}^3/\text{ч}$ (рис. 1с).

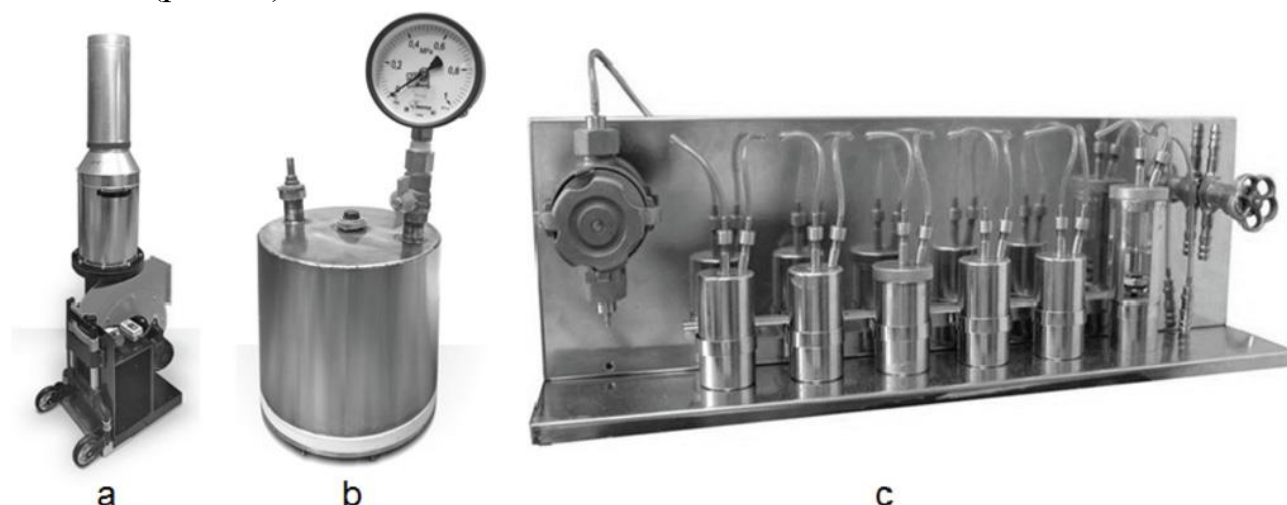


Рисунок 1 – Методы отбора проб: а) установка фильтрации воздуха по активности радионуклидов оценка; б) металлический сосуд для оценки активности радиоактивных благородных газов; в) система барботеров для сбора Н-13 и С-14.

По сравнению со штатными системами контроля радионуклидов в выбросах в атмосферу Белоярской АЭС использованные в исследовании методы и технические средства позволили снизить предел обнаружения (таблица 2):

- на 2-3 порядка для радиоактивных аэрозолей;
- в 3-4 раза для ИРГ;
- в 2 раза для углерода и трития.

Таблица 2 – Значения нижнего порога измерения ОА методов исследования

Радио- нуклид	^3H	^{14}C	Гамма-из- лучатели	^{131}I	^{90}Sr	^{41}Ar	$^{85\text{m}}\text{Kr}$	^{87}Kr	^{88}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe
НПИ, Бк/м ³	3,7	7,4	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^2$	$5,0 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$

Анализ активности радионуклидов после отбора образцов проводился с использованием гамма- и бета-спектрометрии. Измерение активности гамма-излучающих радионуклидов выполнялось на спектрометрической установке с полупроводниковым детектором из особо чистого германия. Для определения

объемной активности стронция-90 в источнике выброса применялся метод жидкой сцинтилляции [11].

Результаты и обсуждение

В результате выполненных трех серий отборов проб на каждом источнике выброса (см. таблицу 1) достоверно установлены активности трех радионуклидов ^3H , ^{41}Ar , ^{137}Cs ,

В выбросах энергоблока №3 (ВТ-3) значения ОА:

- для ^{137}Cs от $4 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ Бк/м³;
- для ^3H от 41 до 59 Бк/м³;
- для ^{41}Ar от 420 до 570 Бк/м³.

В выбросах ВТ-ХЖО и ВТ-УСТ 25 определены значения только для ^{137}Cs $1 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³, соответственно. В выбросах ВТ-СК и ВТ-4 определены значения только для Н-3 от 45 до 55 Бк/м³ и от 21 до 23 Бк/м³, соответственно. Значения ОА других радионуклидов во всех обследованных источниках выбросов находились ниже значений НПИ использованных методов (см. таблицу 2).

Для расчета гипотетической индивидуальной годовой эффективной дозы от каждого источника выбросов без учета рассеивания использовались полученные значения ОА радионуклидов. Гипотетическая доза облучения населения рассчитывается с учетом всех возможных путей облучения, принимая объемную активность каждого радионуклида в воздухе формально равной объемной активности в выбрасываемом воздухе в каждой ВТ. Для тех радионуклидов, для которых измеренная объемная активность оказалась ниже НПИ метода, использовались значения $\frac{1}{2}$ НПИ метода. Без учета разбавления каждый исследованный источник выброса способен формировать индивидуальную годовую эффективную дозу более 10 мкЗв.

Выполнен расчет отношения гипотетической годовой эффективной дозы облучения населения, обусловленной каждым радионуклидом, к годовой эффективной дозе, обусловленной всеми радионуклидами, выбрасываемыми через рассматриваемый источник выбросов. Проведено суммирование отношений в порядке убывания их значений до достижения суммой значения 99 %.

Установленные основные дозообразующие радионуклиды и их вклад в формирование облучения специфичны для каждого источника выброса. Так, в выбросах энергоблока №3 (ВТ-3) Белоярской АЭС без учета рассеивания основной вклад в облучение формируют ^{14}C (38,9%), ^{41}Ar (30,2%), ^{88}Kr (14,6%), ^3H (8,9%), ^{87}Kr (4,5%), ^{137}Cs (1,6%), ^{135}Xe (0,4%). Основные дозообразующие радионуклиды в выбросах энергоблока №4 (ВТ-4) отличаются по составу

радионуклидов и вклада в формирование дозы: ^{14}C (40,0%), ^{88}Kr (24,0%), ^{41}Ar (17,7%), ^{87}Kr (9,6%), ^3H (5,8%), ^{135}Xe (1,0%), $^{85\text{m}}\text{Kr}$ (0,8%), ^{133}Xe (0,5%).

В выбросах из ВТ ХЖО технологически исключено присутствие ИРГ и ^{131}I , а основное воздействие формируют ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co , ^{134}Cs . Для выбросов ВТ-1, ВТ-2, ВТ УСТ-25 технологически возможно присутствие в выбросах таких радионуклидов как ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs .

В выбросах из ВТ САРХ энергоблока №4 технологически возможно присутствие только ^3H . Основную дозу от выбросов ВТ спецкорпуса блока 4 без учета рассеивания формируют ^{14}C , ^3H , ^{137}Cs . Присутствие ИРГ в выбросах из ВТ спецкорпуса блока 4 Белоярской АЭС технологически невозможно.

Кроме установленных основных дозообразующих радионуклидов, согласно требованиям действующих санитарных правил [13], нормативы ПДВ для атомных станций должны быть установлены для ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs . Таким образом, по данным выполненного исследования и проведенных расчетов определен перечень из 13 радионуклидов, для которых в соответствии действующими санитарными правилами и методикой, должны быть установлены нормативы допустимых выбросов для организованных источников Белоярской АЭС [13, 15]. Полученные результаты не противоречат рекомендациям МАГАТЭ [16].

Для оценки реального радиационного воздействия выбросов Белоярской АЭС при нормальной эксплуатации определён фактор разбавления примесей в атмосфере в районе расположения источников и рассчитаны значения для дозового функционала, связывающего активности выброса радионуклида и дозы в критической точке (точке максимального воздействия) [15]. Фактор разбавления рассчитывается для самых консервативных условий с учетом:

- характеристик источников выбросов радиоактивных веществ (высота, диаметр устья трубы, расход и скорость воздуха через устье);
- категории устойчивости атмосферы;
- повторяемости направления, скорости ветра (по 16 румбам);
- частоты и количества атмосферных осадков.
- Значения дозового функционала рассчитаны с учетом:
- корзины питания населения в зоне воздействия выбросов;
- перехода радионуклидов по цепочкам питания (например: атмосфера – почва – растительность – молоко/мясо);
- внешнего облучения (от облака и от осевших на поверхность радионуклидов)

– внутреннего облучения (ингаляционный и пероральный пути).

Расчет фактора разбавления позволил определить критическую точку, в которой при самых неблагоприятных условиях будет сформировано максимальное радиационное воздействие от выбросов радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации АЭС. Такая критическая точка располагается на расстоянии 1200 м в восточном направлении от геометрического центра площадки размещения первой и второй очереди Белоярской АЭС.

На основе полученных значений ОА радионуклидов и значений $\frac{1}{2}$ НПИ метода не обнаруженных радионуклидов рассчитана индивидуальная эффективная доза для критической группы населения в точке максимального воздействия. Полученная величина радиационного воздействия выбросов радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации Белоярской АЭС составила 0,465 мкЗв/год, что существенно ниже уровней воздействия других объектов использования атомной энергии на Урале [17]. Это значение:

- в 21,5 раз ниже минимально значимой дозы 10 мкЗв [18];
- в 429 раз ниже квоты 200 мкЗв для действующих энергоблоков АЭС [13];
- в 107 раз ниже квоты 50 мкЗв для вновь возводимых энергоблоков АЭС [13].

Получено распределение радионуклидов по вкладу в годовую дозу облучения населения в критической точке местности Белоярской АЭС: ^{14}C (32,6%), ^{137}Cs (23,8%), ^{41}Ar (15,3%), ^{88}Kr (11,3%), ^3H (7,5%), ^{87}Kr (3,9%), ^{60}Co (2,8%), ^{134}Cs (1,9%), ^{135}Xe (0,4%), $^{85\text{m}}\text{Kr}$ (0,2%), ^{133}Xe (0,1%), ^{131}I и ^{90}Sr <0,01%.

Заключение

Стратегия формирования устойчивого энергообеспечения человечества на тысячелетия предусматривает увеличение количества АЭС с реакторными установками типа БН. Для реализации постоянной потребности общества в надежности и безопасности атомной энергетики необходимо учитывать опыт эксплуатации энергоблока БН-600 и реализованные улучшения энергоблока БН-800, включая практику оптимизации радиационного воздействия на население и окружающую среду от выбросов радионуклидов при нормальной эксплуатации АЭС.

В результате многолетних исследований радионуклидного состава газоаэрозольных выбросов впервые идентифицированы 13 основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС с реакторными установками типа БН.

Расчетная эффективная доза для критической группы населения от годовых выбросов Белоярской АЭС составляет $4,65 \cdot 10^{-7}$ Зв/год. Основной вклад формируют ^{14}C (32,6 %), ^{137}Cs (23,8 %). Вклад всех идентифицированных ИРГ составляет 31,3 %, вклад трития 7,5 %. Максимальное радиационное воздействие от выбросов Белоярской АЭС формируется на расстоянии 1200 м в восточном направлении от геометрического центра площадки размещения первой и второй очереди Белоярской АЭС.

Суммарная расчетная доза облучения населения в критической точке местности при годовых выбросах радионуклидов Белоярской АЭС существенно ниже уровня минимально значимой дозы (10 мкЗв/год). Достигнуты уровень воздействия безусловно обеспечивает приемлемый индивидуальный пожизненный риск для населения (менее 10^{-6}), проживающего в районе размещения Белоярской АЭС и гарантирует устойчивое функционирование естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов.

Библиографический список

1. Пышкина М. Д. Определение основных дозообразующих нуклидов в выбросах АЭС PWR И ВВЭР / М. Д. Пышкина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 2 (18). – С. 98–107.
2. Екидин А. А. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС / А. А. Екидин, М. В. Жуковский, М. Е. Васянович // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 106–108.
3. Десятов Д. Д. Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2018. – № 1 (21). – С. 88–96.
4. Назаров Е. И. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС / Е. И. Назаров, А. А. Екидин, А. В. Васильев // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61, № 12/2 (732). – С. 67–73.
5. Екидин А. А. Современные технологии управления воздействием на окружающую среду как инструмент соблюдения принципа ALARA / А. А. Екидин, А. В. Васильев, М. Е. Васянович // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 2 (18). – С. 67–74.
6. Поступление радиоактивного иода в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС / А. А. Екидин, К. Л. Антонов, М. Е. Васянович [и др.] // Радиохимия. – 2019, – Т. 61, № 3, – С. 251–262.
7. Особенности мониторинга радиоактивных аэрозолей и газов. Тенденции развития аналитических фильтрующих материалов / И. А. Капустин, Ю. Н. Филатов, И. Ю. Филатов, А. В. Рагуткин // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 3 (83). – С. 36–41.

8. Совершенствование методов контроля йода-131 в выбросах атомных станций / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, И. А. Капустин, И. Ю. Филатов // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 3 (83). – С. 17–24.
9. Определение физико-химических форм изотопов йода в вентиляционной системе реакторной установки ИВВ-2М / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, Д. В. Марков [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 4. – С. 237–239.
10. Control of Aerosol and Gaseous Compounds of Iodine Isotopes in the Ventilation System of the IVV-2M Reactor Facility / A. A. Ekinin, M. E. Vasyanovich, K. L. Antonov [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol. 81, Is. 10. – P. 1494–1498.
11. Метод жидкой сцинтилляции для определения объемной активности стронция-90 в источниках выброса / Е. Л. Мурашова, А. С. Антушевский, М. Е. Васянович, А. А. Екидин // АНРИ. – 2019. – № 1 (96). – С. 17–26.
12. European Commission Radioactive Discharges Database (RADD). – URL: <http://europa.eu/radd/nuclideDischargeOverview.dox?pageID=NuclideDischargeOverview> (дата обращения: 05.10.2017).
13. СанПин 2.6.1.24–03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) : постановление от 28 апреля 2003 года № 69. – Москва : Минздрав России, 2003. – 41 с.
14. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment : General Safety Guide. – Vienna : IAEA, 2018. – 71 p. – (IAEA Safety Standards Series ; № GSG-9). – ISBN 978-92-0-102418-3.
15. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух : методика МТ 1.2.1.15.1176–2016 / Концерн Росэнергоатом. – Москва, 2016. – 76 с.
16. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact. – Vienna : IAEA, 2016. – Vol. 12/13. – P. 40–44. – (IAEA Nuclear Energy Series ; № NG-T-3.15).
17. Радиоактивные беды Урала / В. И. Уткин, М. Я. Чеботина, А. В. Евстигнеев [и др.] ; под ред. В. И. Уткина. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 94 с.
18. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Part 3 = Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Ч. 3. – Vienna : IAEA, 2015. – (IAEA Safety Standards Series ; № GSR). – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/-Pub1578_web-57265295.pdf (дата обращения: 13.05.2019).